



Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID-19. The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect, the company's public news and information website.

Elsevier hereby grants permission to make all its COVID-19-related research that is available on the COVID-19 resource centre - including this research content - immediately available in PubMed Central and other publicly funded repositories, such as the WHO COVID database with rights for unrestricted research re-use and analyses in any form or by any means with acknowledgement of the original source. These permissions are granted for free by Elsevier for as long as the COVID-19 resource centre remains active.

Étude de l'influence potentielle de l'humidité et de la température dans la propagation de la pandémie COVID-19

Investigating the potential influence of humidity and temperature in the spread of COVID-19 pandemic

Alix Roumagnac
Eurico de Carvalho Filho
Raphaël Bertrand
Anne-Kim Banchereau
Guillaume Lahache

20, rue Didier Daurat, 34170 Castelnau-le-Lez

RÉSUMÉ

La pandémie COVID-19, qui a débuté au début de l'année 2020, paralyse la planète depuis de nombreux mois. Plusieurs pays qui ont été durement touchés par une première vague ont connu une accalmie avant de faire face à un nouveau pic épidémique. Le climat joue potentiellement un rôle dans la propagation de nombreux virus respiratoires. Il est apparu important de savoir si cela pouvait être aussi le cas pour le nouveau coronavirus, le SARS-CoV-2. Si le rôle du climat dans la transmission est encore difficilement quantifiable, il est clair que d'autres facteurs rentrent en compte dans la transmission de la COVID-19 à savoir principalement le respect des règles de distanciation physique et des gestes barrières.

© 2020 Société Française de Médecine de Catastrophe. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

SUMMARY

The COVID-19 pandemic that began in early 2020 has been paralyzing the planet for several months. Several countries, who were hardly hit by a first wave, experienced a lull period before facing a second epidemic peak. Climate potentially plays a role in the spread of many respiratory viruses. Thus, it is vital to know whether this could also be the case for the new coronavirus. While the role of climate in transmission is still difficult to infer, it is clear that other factors matter in the transmission of COVID-19, notably the respect of physical distancing rules and barrier gestures.

© 2021 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société Française de Médecine de Catastrophe.

INTRODUCTION

En décembre 2019, une épidémie de pneumonies a vu le jour dans la ville de Wuhan en Chine. Par la suite, cette épidémie a évolué au niveau mondial. Le 11 février 2020, l'OMS a nommé officiellement la maladie : « maladie à coronavirus 2019 (COVID-19) » et le 11 mars 2020, l'OMS a annoncé que la COVID-19 pouvait être qualifiée de pandémie,

la première déclenchée par un coronavirus, le SARS-CoV-2.

PREDICT Services accompagne plus de 25 000 communes françaises, des entreprises, des citoyens et des sociétés d'assurances dans la gestion des risques majeurs en France et dans le monde. À l'occasion de la crise causée par la COVID-19, PREDICT Services a déployé une assistance spécifique sur ce sujet auprès de ses usagers : document synthétique de gestion de la pandémie dans le

MOTS CLÉS

Coronavirus
COVID-19
Maladie
Climat
Température
Humidité
Propagation
Épidémie
Indice

KEYWORDS

Coronavirus
COVID-19
Disease
Climate
Temperature
Humidity
Spread
Epidemic
Index

Auteur correspondant.
Adresse e-mail :
alix.roumagnac@predictservices.com

cadre du plan communal de sauvegarde et des plans de continuité d'activité, main courante numérique, appui téléphonique, etc.

Face à l'hétérogénéité temporelle et géographique de la propagation de la COVID-19, la question d'une corrélation potentielle entre la propagation du virus et des facteurs climatiques s'est posée. De façon à mieux comprendre, anticiper et accompagner ses usagers dans leur prise de décision, PREDICT Services a souhaité approfondir le sujet, en lien avec son corps de métier. Une étude a été ainsi menée, durant cette épidémie, dont les résultats sont présentés dans ce présent document.

PARAMÈTRES RETENUS

De nombreux virus ne peuvent vivre seuls dans l'air. Ils se propagent grâce aux particules en suspension dans l'air (vapeur d'eau, particules fines, etc.) puis se déposent sur les surfaces. Les aérosols qui peuvent contenir ces virus sont susceptibles de rester jusqu'à plusieurs heures en suspension dans l'air. Ils sont alors météo-dépendant :

Lorsque la température est inférieure à 3 °C, l'air ne contient pas assez de vapeur d'eau pour favoriser la propagation. A contrario, lorsqu'il fait trop chaud, les gouttelettes s'évaporent plus rapidement et sont donc contaminantes moins longtemps.

Lorsque l'air est très humide, les gouttelettes qui contiennent la charge virale s'agrègent à l'humidité ambiante, elles deviennent plus lourdes et chutent plus rapidement. Lorsque l'air est très sec, il y a moins de gouttelettes susceptibles de supporter la charge virale. Lorsque l'air est en zone intermédiaire, les gouttelettes restent en suspension et elles se propagent mieux.

Les rayons ultra-violettes sont particulièrement délétères sur le matériel génétique (ARN) des virus à l'air libre, ils les détruisent. Cette étude s'est plus particulièrement intéressée aux effets de la température et de l'humidité absolue. Une étude réalisée par le *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* au mois de mars 2020 montre que 90 % des infections se seraient produites dans des régions où la température se situe entre 3 et 17 degrés et où l'humidité absolue se situe entre 4 et 9 g/m³, 35 à 85 % d'humidité relative (Fig. 1) [1]. L'humidité absolue d'une masse d'air représente la quantité en grammes de vapeur d'eau présente dans un volume d'air sec donné

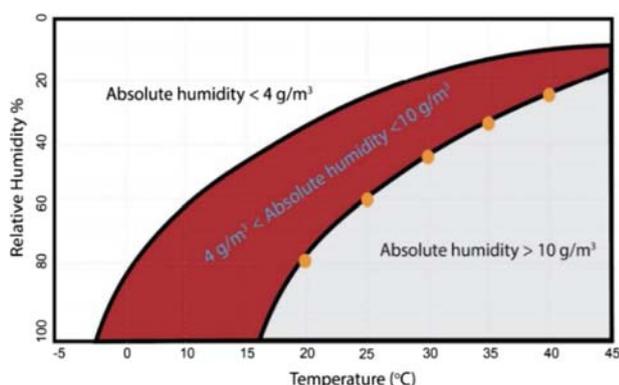


Figure 1. Variation de l'humidité absolue en fonction de la température et de l'humidité relative. En rouge la zone où l'humidité absolue était comprise entre 4 et 10 g/m³ [1].

(1 m³). L'humidité relative s'exprime en pourcentage et correspond au rapport entre la quantité d'eau que contient l'air (humidité absolue) et la quantité maximale qu'il peut contenir pour une température donnée et ceci avant de se condenser. Les variations de la température influencent directement l'humidité relative, de sorte que l'humidité relative baisse quand la température s'élève et augmente lorsque la température baisse. D'autres études analysent l'influence potentielle des conditions météorologiques sur l'évolution de la pandémie, notamment concernant la température [2].

CRÉATION D'UN INDICE DE TRANSMISSION POTENTIELLE DU VIRUS

Afin d'analyser la relation potentielle entre les conditions climatiques favorables à la transmission du virus et les données épidémiologiques, l'index PREDICT de transmissivité climatique de la COVID-19 (IPTCC) a été créé pour caractériser la potentialité de transmission du virus selon les conditions climatiques.

La formule de l'humidité absolue calculée par l'équation de Clausius-Clapeyron [1,3] a été reprise (1) et l'IPTCC a été formulé en fonction de la température, de l'humidité relative et de l'humidité absolue avec l'humidité absolue en g/m³ (AH), l'humidité relative en pourcentage (RH) et la température en degrés Celsius (T) (2).

$$AH = \frac{6.112 * e^{\frac{17.67T}{e+243.5}} * RH * 2.1674}{273.15 + T} \quad (1)$$

$$IPTCC = 100 * e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(T-7.5)^2}{196} + \frac{(RH-75)^2}{625} + \frac{(AH-6)^2}{2.89} \right]} \quad (2)$$

Un code colorimétrique de cet indice a été créé afin de visualiser l'évolution de la transmission du virus dans le temps et dans l'espace (Fig. 2 et 3).

ÉTUDE DE L'INFLUENCE POTENTIELLE DE L'HUMIDITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE DANS LA PROPAGATION DE LA COVID-19 EN FRANCE LORS DE LA PREMIÈRE VAGUE

Le nombre des contaminations au nouveau coronavirus a fortement augmenté en France à partir du mois de mars 2020, conduisant à un confinement généralisé de toute la population entre le 16 mars 2020 et le 10 mai 2020.

Méthode

Les données climatiques (température, humidité) des 63 stations du réseau de Météo-France réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain ont été récupérées afin de calculer l'IPTCC sur l'ensemble du territoire métropolitain (Tableau 1) [4]. La température moyenne et l'humidité moyenne observées par décade (diurne et nocturne) et par station ont été utilisées.

Résultats

Afin de vérifier la pertinence de l'IPTCC, son évolution au cours du temps a été comparée au nombre de décès liés à la COVID-19 par million d'habitant [5].

Tableau I. Stations du réseau Météo-France utilisées dans le calcul de l'IPTCC.

Auvergne-Rhône-Alpes	Vichy-Charmeil, Aurillac, Grenoble-Saint-Geoirs, Saint-Etienne-Bouthéon, Clermont-Ferrand, Lyon-Saint-Exupéry
Bourgogne-Franche-Comté	Dijon-Longvic, Besançon, Luxeuil, Macon, Auxerre-Perrigny
Bretagne	Brest-Guipavas, Quimper, Dinard, Rennes-Saint-Jacques
Centre-Val de Loire	Bourges, Avord, Tours, Orléans
Corse	Ajaccio, Figari, Bastia
Grand Est	Reims-Prunay, Saint-Dizier, Nancy-Ochey, Strasbourg-Entzheim, Colmar-Meyenheim, Bâle-Mulhouse
Hauts-de-France	Dunkerque, Lille-Lesquin, Boulogne-sur-Mer
Île-de-France	Paris-Montsouris, Roissy
Normandie	Caen-Carpiquet, Evreux-Huest, Alençon, Dieppe
Nouvelle-Aquitaine	Cognac, La Rochelle-Ile-de-Ré, Brive-Souillac, Bordeaux-Mérignac, Cazaux, Mont-de-Marsan, Agen-La Garenne, Biarritz-Pays-Basque, Pau-Uzein, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde
Occitanie	Carcassonne, Nîmes-Garons, Toulouse-Blagnac, Montpellier-Fréjorgues, Tarbes-Lourdes, Perpignan
Pays de Loire	Nantes-Bouguenais, Laval-Etronnier, Le Mans
PACA	Embrun, Nice, Marignane, Hyères, Avignon, Ornge

L'IPTCC moyen en France entre le 1^{er} janvier 2020 et le 31 mars 2020 a été calculé (Fig. 4). Un délai de 10 jours, entre la fin de la période de calcul de l'IPTCC et les données de mortalité, a été choisi afin de prendre en compte

le temps d'incubation de la maladie à partir de conditions climatiques lors d'un jour donné (personnes ayant contracté la maladie lors de la deuxième quinzaine du mois de mars).

IPTCC	Code couleur	Définition
[0,20[	Vert	Conditions climatiques limitant la circulation aérienne du virus.
[20,75[	Jaune	Conditions climatiques devenant favorables à la circulation aérienne du virus.
[75,90[	Orange	Conditions climatiques favorables à la propagation aérienne du virus.
[90,97[	Rouge	Conditions climatiques très favorables à la propagation aérienne du virus.
[97,100]	Violet	Conditions climatiques extrêmement favorables à la propagation aérienne du virus.

Figure 2. Définition de l'IPTCC.

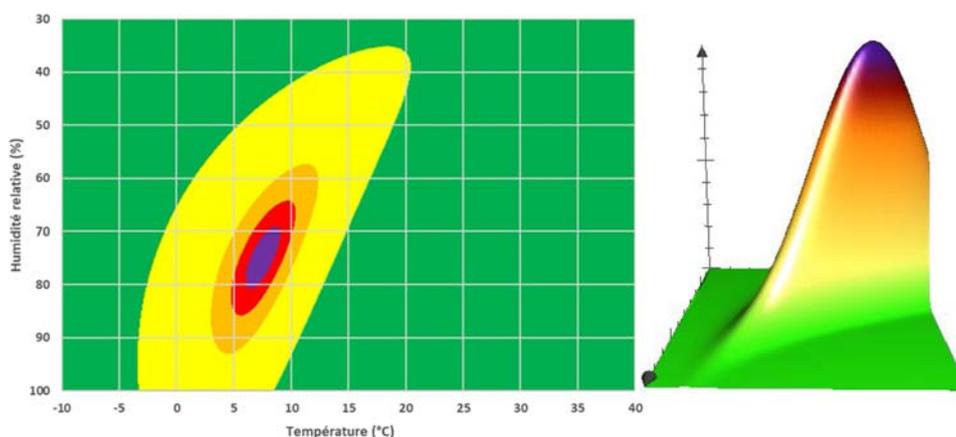


Figure 3. Code colorimétrique de l'IPTCC selon l'humidité relative moyenne et la température moyenne. Vues en 2D et en 3D.

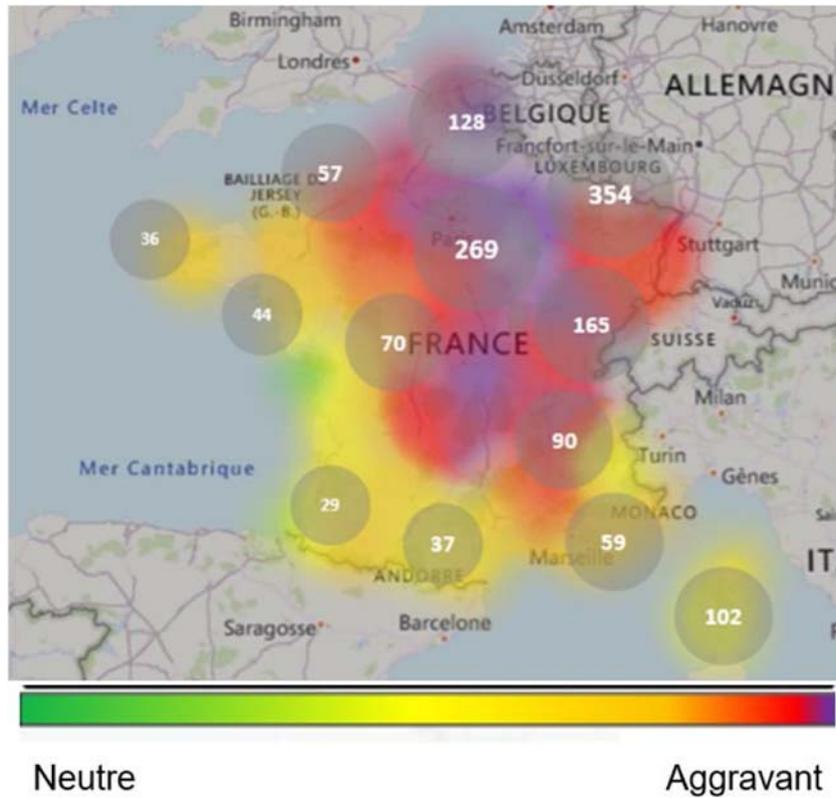


Figure 4. IPTCC en France entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 2020 et nombre de décès liés à la COVID-19 par million d'habitant au 10 avril 2020 dans les régions françaises.

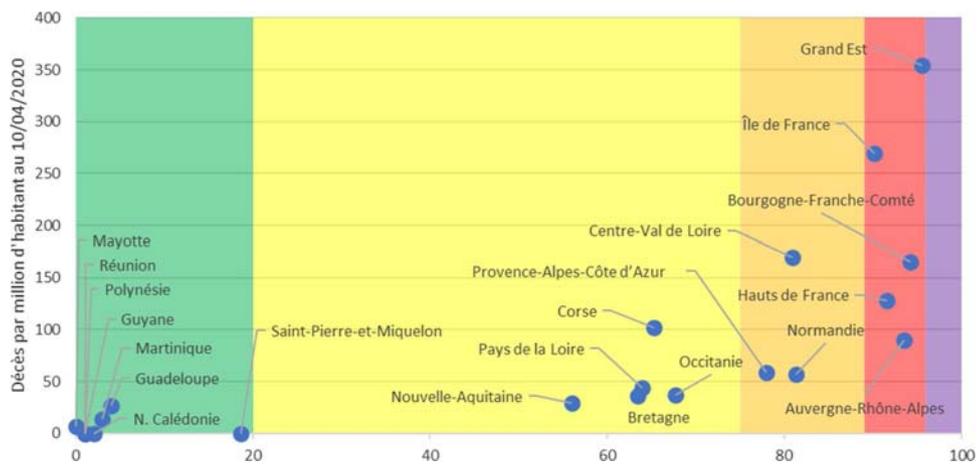


Figure 5. IPTCC France entre le 1^{er} février et le 10 mars 2020 et nombre de décès liés à la COVID-19 par million d'habitant au 10 avril 2020 dans les régions françaises.

Les régions qui ont le nombre de décès par million d'habitants le plus élevé sont des régions où l'IPTCC est le plus haut (Grand Est, Île-de-France) (Fig. 4 et Fig. 5). Inversement, les régions qui ont déclaré le moins de décès liés au coronavirus présentent un IPTCC beaucoup moins important (DOM-TOM,

Nouvelle-Aquitaine). Il est à noter que malgré des premiers clusters en Bretagne et Languedoc au début de la première vague, l'épidémie n'a pas explosé dans ces deux régions. Afin de mettre en lumière la relation potentielle entre la propagation de la COVID-19 et le climat, le nombre de nouvelles

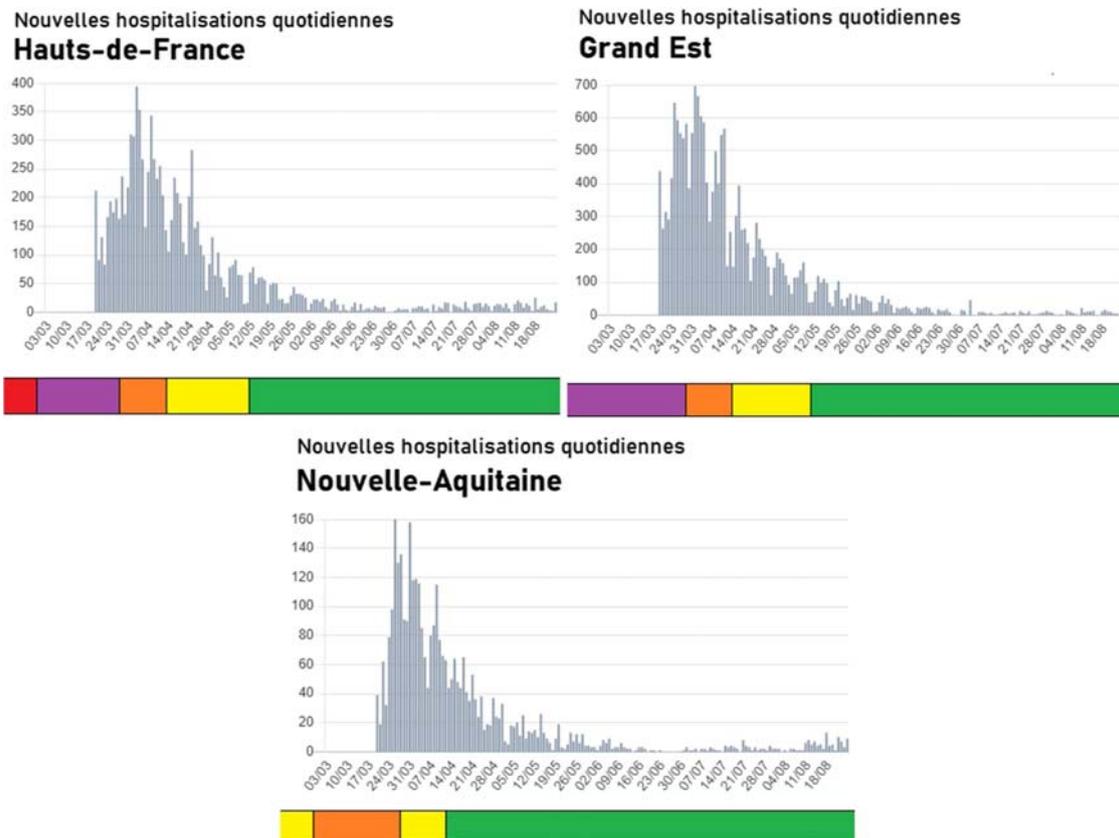


Figure 6. Comparaison entre l'IPTCC (en bas des graphiques) et l'évolution du nombre de nouvelles hospitalisations dans trois régions françaises.

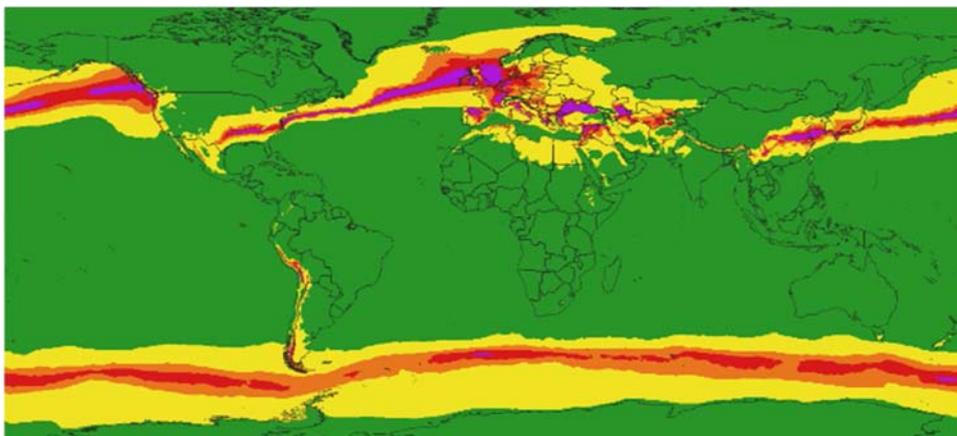


Figure 7. IPTCC mondial pour le mois de février 2020.

hospitalisations quotidiennes a été comparé à l'IPTCC dans trois régions métropolitaines : Hauts-de-France, Grand Est et Nouvelle-Aquitaine (Fig. 6). L'IPTCC est très fort à partir de février, avant le début de la vague épidémique, et jusqu'à la mi-avril. Il diminue ensuite sensiblement entre mi-avril et mi-mai selon les régions et le nombre de nouvelles hospitalisations

quotidiennes diminue sur la même période. La baisse des nouvelles hospitalisations entre avril et mi-mai peut largement s'expliquer largement par la mise en place d'un confinement généralisé entre le 16 mars et le 10 mai 2020. Cependant en Nouvelle-Aquitaine et de façon générale dans l'ouest de la France, l'IPTCC n'a pas atteint les mêmes hautes

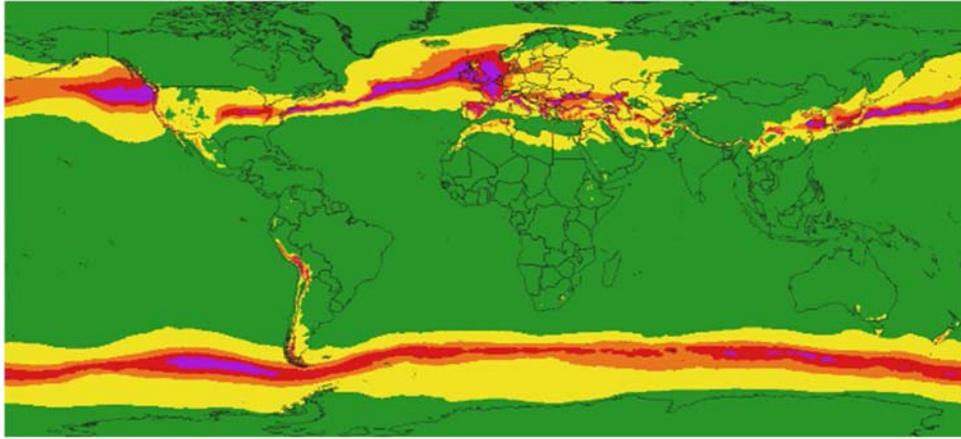


Figure 8. IPTCC mondial pour le mois de mars 2020.

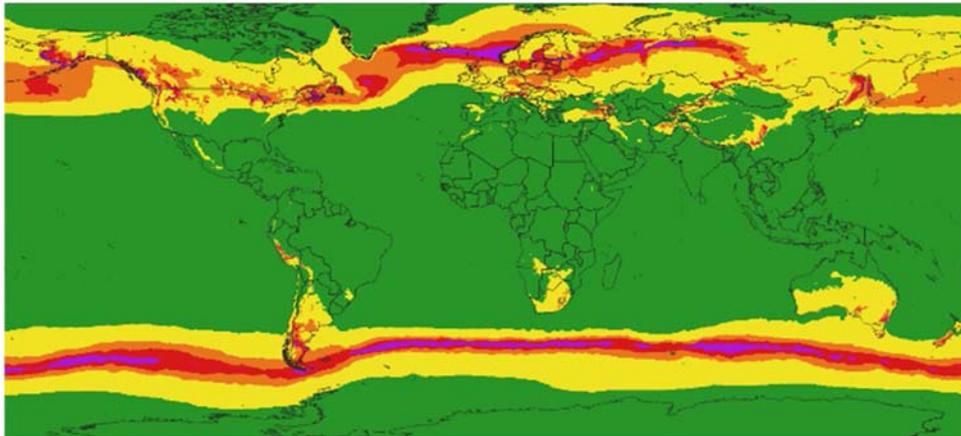


Figure 9. IPTCC mondial pour le mois de mai 2020.

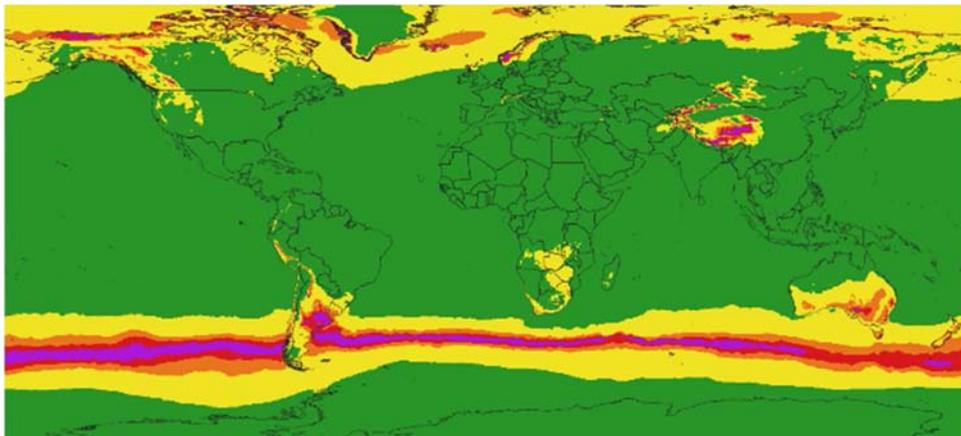


Figure 10. IPTCC mondial pour le mois de juillet 2020.

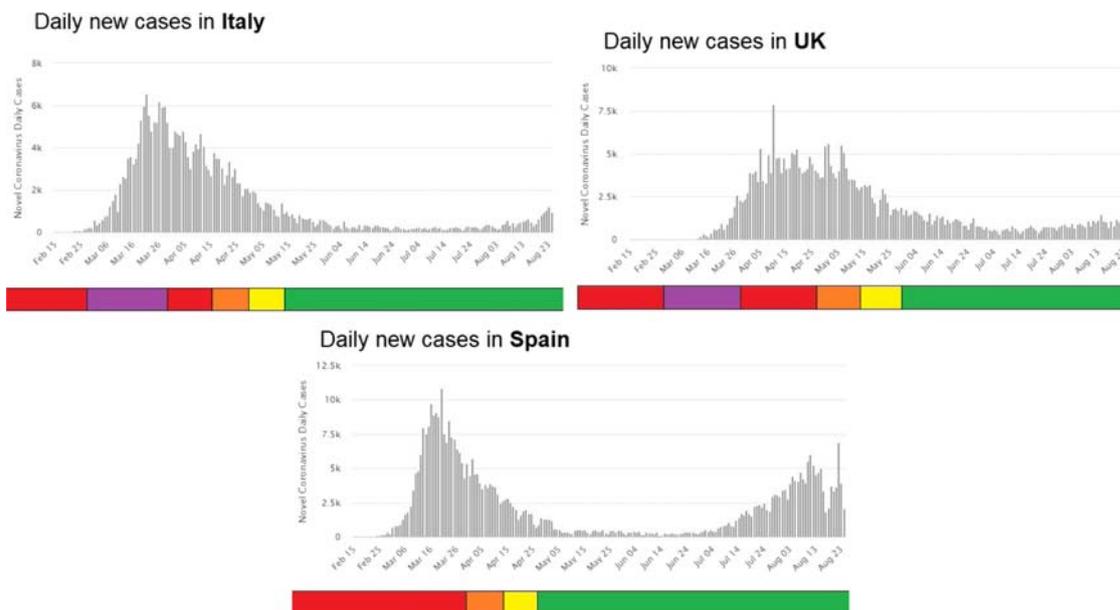


Figure 11. Comparaison entre l'IPTCC et l'évolution du nombre de nouveaux cas quotidiens dans plusieurs pays de l'hémisphère Nord.

valeurs que dans les Hauts-de-France et le Grand Est. Or, les régions de la façade Atlantique ont été touchées par une vague épidémique de moindre intensité avec un nombre de nouvelles hospitalisations deux à trois fois moins élevés que dans le Nord-Est de la France durant le pic épidémique du début du mois d'avril 2020 (ces trois régions comptent sensiblement le même nombre d'habitants). Enfin, on observe surtout que le nombre de nouvelles hospitalisations est resté très faible dans toute la France durant les trois mois qui ont suivi la fin du confinement (10 mai - 10 août). L'IPTCC était alors au vert durant cette période, signifiant des conditions climatiques limitant potentiellement la circulation du virus.

ÉTUDE DE L'INFLUENCE POTentielle DE L'HUMIDITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE DANS LA PROPAGATION DE LA COVID-19 DANS LE MONDE

Méthode

Après les premiers résultats sur l'étude entre la COVID-19 et le climat en France, les recherches ont été étendues à l'ensemble du monde. Les données de température et d'humidité moyenne sur l'ensemble de la planète sont issues de la base de données ERA5, du programme d'observation COPERNICUS de la Terre de l'Union Européenne qui permet d'avoir accès aux réanalyses climatiques à l'échelle mondiale avec des données de température et d'humidité horaires [6]. L'IPTCC a ainsi pu être calculé en base mensuelle à partir des données climatiques observées, et également à partir des normales, moyennes mensuelles de la période [1981–2010]. Les données d'IPTCC calculées à partir des données observées ont été croisées avec le nombre de cas confirmés de COVID-19 par million d'habitants [7]. Les cartes ont été créées sous QGIS [8].

Résultats lors de la première vague

L'IPTCC mondial du mois de février 2020 montre que la région du Wuhan en Chine présente un indice élevé tout comme en Europe de l'Ouest (Fig. 7). Pour le mois de mars 2020 durant lequel la pandémie de coronavirus s'est déclarée dans le monde, l'IPTCC est fort sur une bande centrale des États-Unis et reste très élevé sur une grande partie de l'Europe (notamment entre l'Espagne, l'Italie, la France, le Bénélux et le Royaume-Uni) (Fig. 8). Or, le nombre de cas de COVID-19 et d'hospitalisations a grimpé de manière exponentielle dans ces régions du monde entre les mois de mars et d'avril 2020. Inversement, l'IPTCC est globalement faible voire nul dans les pays de l'hémisphère sud. Ces pays-là n'ont en effet pas connu de vague épidémique majeure durant le premier trimestre 2020.

Il ressort que les pays dont les conditions de température et d'humidité sont plus favorables à la propagation de la COVID-19 (i.e. IPTCC plus proche de 100) présentent souvent le nombre de cas confirmés les plus élevés. C'est le cas en Europe où le nombre de cas a explosé durant le mois de mars 2020 (Italie, Espagne, France). À l'inverse, ceux présentant les conditions les plus défavorables à la circulation du virus (i.e. IPTCC plus proche de 0), présentent un nombre cas confirmés plus faible à cette période (Russie, Afrique du Sud, etc.).

Concernant le mois de mai 2020, le calcul de l'IPTCC mondial indique une sensible diminution de l'indice sur l'Europe du Sud (Péninsule Ibérique, Italie, France), la Chine et le Japon (Fig. 9). Dans ces pays qui se sont déconfinés au cours de ce mois de mai, le nombre de nouveaux cas par jour a sensiblement diminué et n'est pas reparti à la hausse dans les semaines suivantes. À l'inverse, l'IPTCC commence à augmenter dans des pays de l'hémisphère sud comme en Australie, Afrique du Sud ainsi qu'en Argentine où les cas se développent.

Durant le mois de juillet 2020, l'IPTCC est clairement au vert en Europe où aucune deuxième vague n'est observée (Fig. 10).

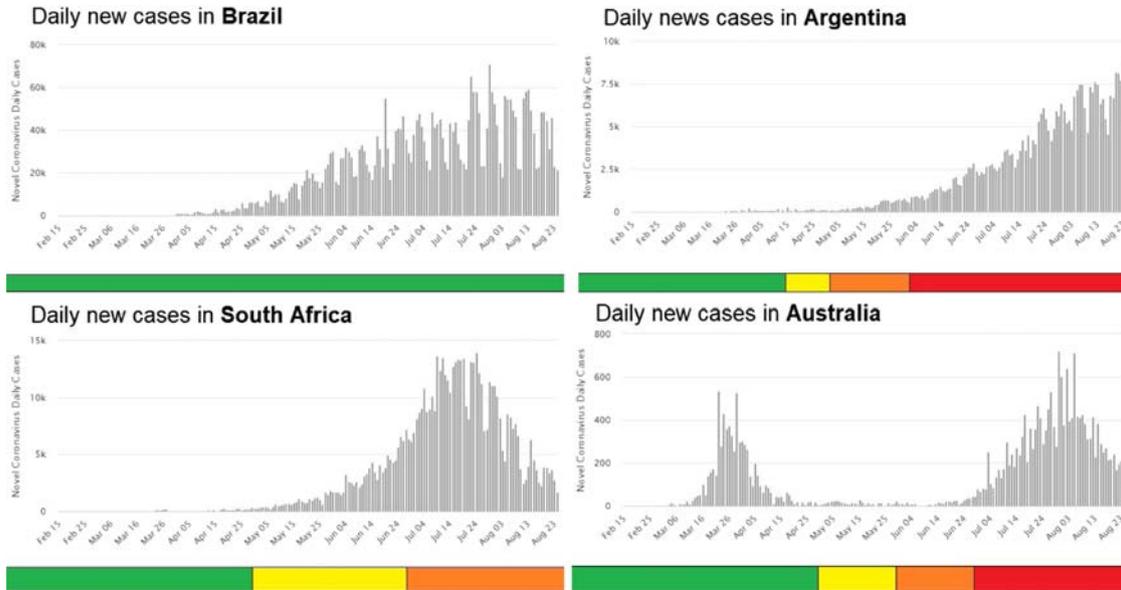


Figure 12. Comparaison entre l'IPTCC et l'évolution du nombre de nouveaux cas quotidiens dans quatre pays de l'hémisphère Sud.

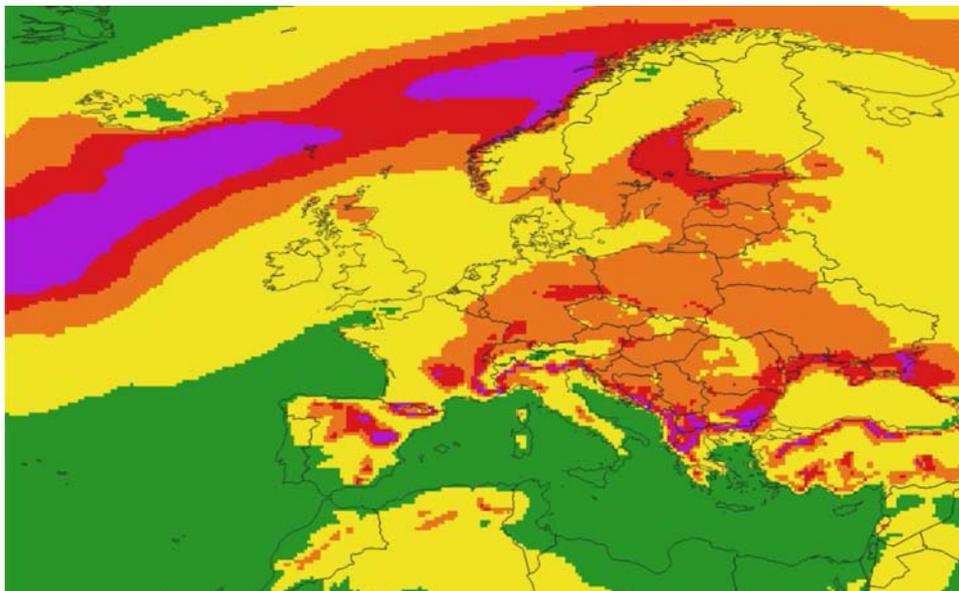


Figure 13. IPTCC mondial pour le mois de novembre 2020.

Le nombre de contaminations augmente faiblement et quelques clusters sont observés localement (en Mayenne en France ou encore en Catalogne en Espagne) mais après deux mois de déconfinement nous n'observons pas de reprise épidémique intense. Inversement, le nombre de cas augmente en Argentine et en Afrique du Sud. L'Australie est quant à elle confrontée à une nouvelle hausse du nombre de cas et la région de Melbourne est confinée une seconde fois. Une certaine corrélation semble donc se confirmer entre l'IPTCC et l'évolution de la propagation de la maladie. L'épidémie se propage cependant dans des pays où l'IPTCC est faible, notamment le Brésil et l'Inde.

Afin de mettre en lumière le potentiel lien entre la propagation de la COVID-19 et le climat, le nombre de nouveaux cas quotidiens a été comparé à l'IPTCC correspondant dans trois pays d'Europe occidentale : l'Espagne, l'Italie et le Royaume-Uni (Fig. 11) [8].

La vague épidémique du début de printemps 2020 s'est déroulée sous des valeurs d'IPTCC hautes à très hautes. Ensuite une diminution sensible des nouveaux cas, coïncide avec un IPTCC qui diminue sensiblement.

La même méthode a été appliquée pour quelques pays de l'hémisphère sud : l'Afrique du sud, l'Australie, l'Argentine et le Brésil (Fig. 12). En Argentine et Afrique du Sud, pays épargnés

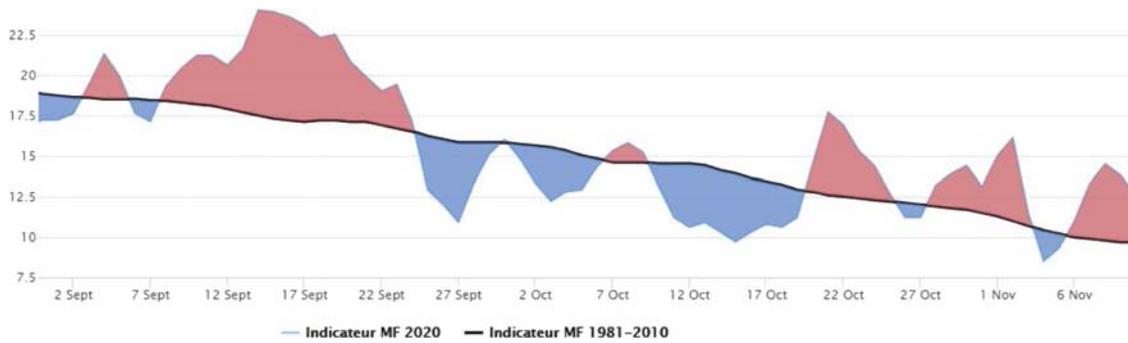


Figure 14. Indicateur thermique national (source : Météo-France via Infoclimat).

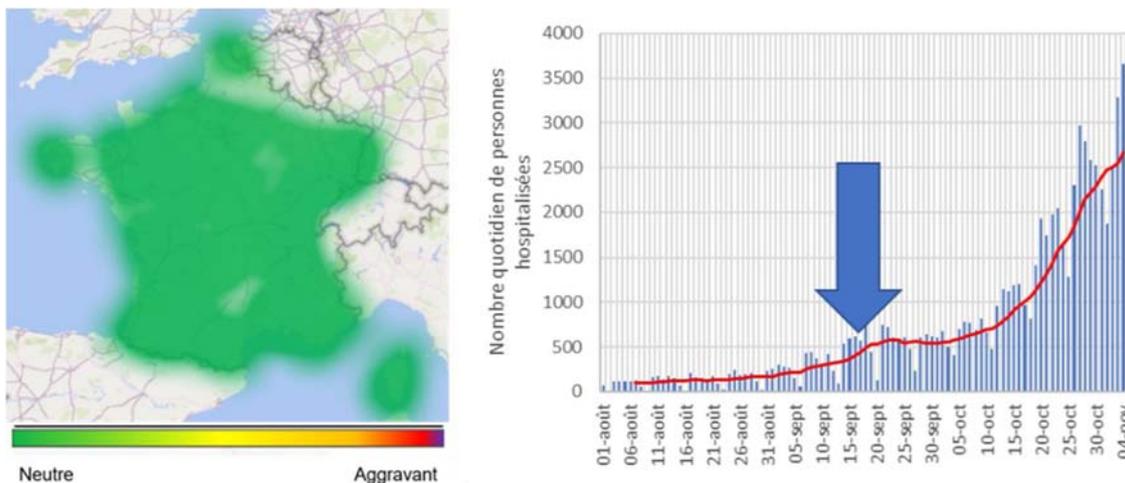


Figure 15. IPTCC entre le 11 et le 20 septembre et nombre d'hospitalisations quotidiennes en France.

par l'épidémie durant le printemps 2020, on constate une forte progression du nombre de cas quotidiens à partir du mois de juin 2020 qui colle parfaitement avec une sensible hausse de notre indice.

En Australie, une première vague a eu lieu au mois de mars 2020, mais l'IPTCC était au vert. Néanmoins on constate que la vague a duré moins longtemps qu'en Europe. Mais une reprise a lieu depuis le début du mois de juillet 2020 alors que la température et l'humidité sont rentrées dans des valeurs propices à la propagation du virus.

Le Brésil fait face à un nombre de nouveaux cas élevé depuis le mois de mai 2020 et cela ne semble pas cesser. Pourtant, l'IPTCC est vert : cela nécessite un approfondissement de l'étude afin d'en déterminer les limites.

Résultats lors de la deuxième vague en Europe

Durant les mois de septembre-octobre 2020, l'étude a particulièrement porté sur la reprise de l'épidémie en Europe. Une hausse de l'IPTCC est constatée sur la majeure partie du continent européen au cours du mois d'octobre 2020. Une reprise intense et assez homogène de l'épidémie a été parallèlement observée [8].

Au cours du mois de novembre, l'IPTCC est élevé sur l'ensemble du Vieux Continent et plus particulièrement entre l'Est de la

France, l'Allemagne et l'Ukraine (Fig. 13). Ces pays connaissent actuellement une deuxième vague épidémique marquée.

ÉTUDE DE L'INFLUENCE POTENTIELLE DE L'HUMIDITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE DANS LA PROPAGATION DE LA COVID-19 EN FRANCE LORS DE LA SECONDE VAGUE

Après une accalmie durant l'été, le nombre de contaminations à la COVID-19 a de nouveau augmenté en France à partir du mois du mois de septembre 2020. De nouvelles mesures ont été prises par le Gouvernement (port du masque obligatoire dans les villes, protocoles sanitaires renforcés). Mais face à une reprise trop virulente de l'épidémie à partir de la mi-octobre, plusieurs agglomérations ont été placées sous couvre-feu avant qu'un nouveau confinement national ne soit prononcé à partir du 30 octobre 2020.

Contexte météorologique

L'indicateur thermique national développé par Météo-France a été utilisé pour suivre l'évolution des températures à l'échelle nationale [9]. Cet indicateur repose sur le calcul de la

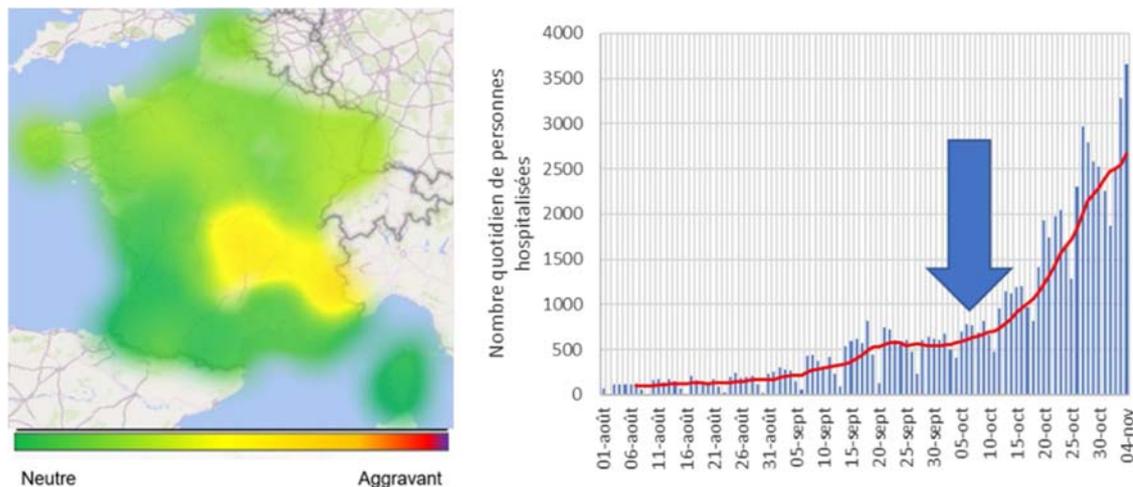


Figure 16. IPTCC entre le 1^{er} et le 10 octobre et nombre d'hospitalisations quotidiennes en France.

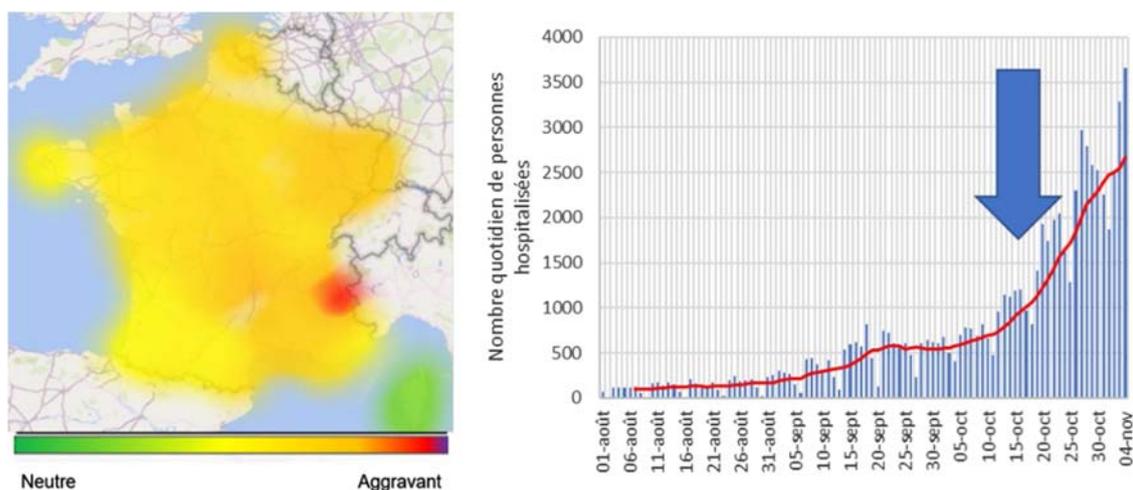


Figure 17. IPTCC entre le 11 et le 20 octobre et nombre d'hospitalisations quotidiennes en France.

température moyenne de 30 stations réparties régulièrement sur le territoire métropolitain.

Le mois de septembre a connu globalement des températures au-dessus des moyennes saisonnières (Fig. 14). Une vague de chaleur exceptionnelle a notamment touché le pays autour de la mi-septembre. La fin du mois ainsi que le début du mois d'octobre ont été plus frais. Un refroidissement a touché le pays durant la deuxième décennie d'octobre, avec des températures parfois assez largement sous les normales de saison dans certaines régions.

La fin du mois d'octobre et le début du mois de novembre ont vu des températures à nouveau plus douces.

Mise en relation avec les données épidémiologiques

Les données climatiques (température, humidité) des 63 stations du réseau de Météo-France réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain ont été récupérées afin de calculer l'IPTCC sur l'ensemble du territoire métropolitain (Tableau I)

[4]. La température moyenne et l'humidité moyenne observées par décennie (diurne et nocturne) et par station ont été utilisées. Les données épidémiologiques quotidiennes de Santé Publique France (nombre de nouvelles hospitalisations et de décès quotidiens au niveau départemental, régional et national, ont été utilisés) [5].

Durant la deuxième décennie de septembre, qui a donc été particulièrement chaude, l'IPTCC était très bas, voire nul sur l'ensemble du pays (Fig. 15). Les hospitalisations dues à la COVID-19 étaient en légère hausse depuis la fin du mois d'août, puis marquent un petit pic autour de la mi-septembre. Cette hausse pourrait s'expliquer par le brassage de la population entre le retour des vacances d'été et surtout la rentrée scolaire et la reprise du travail pour des millions de personnes. La reprise de l'épidémie est à ce moment-là sous contrôle et le nombre d'hospitalisations quotidiennes se stabilise durant la dernière décennie du mois de septembre.

Durant la troisième décennie du mois de septembre, l'IPTCC reste globalement faible en France, mais une hausse est constatée en région Auvergne-Rhône-Alpes qui est soumise

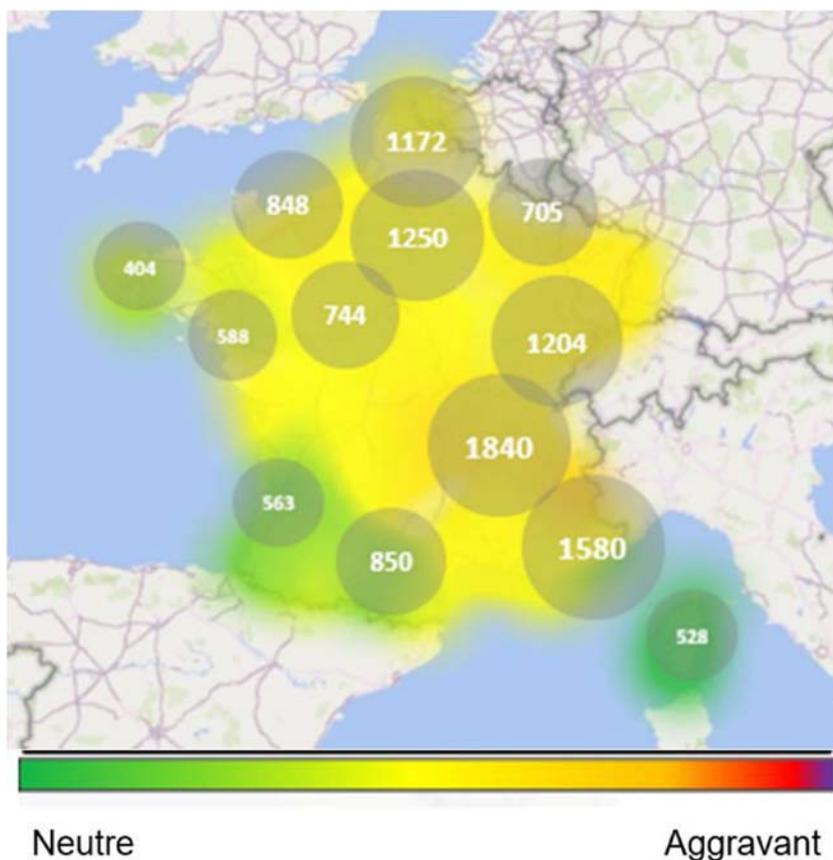


Figure 18. IPTCC moyen sur l'ensemble du mois d'octobre et nombre d'hospitalisations liées à la pandémie COVID-19 par million d'habitants entre le 1^{er} et le 31 octobre 2020.

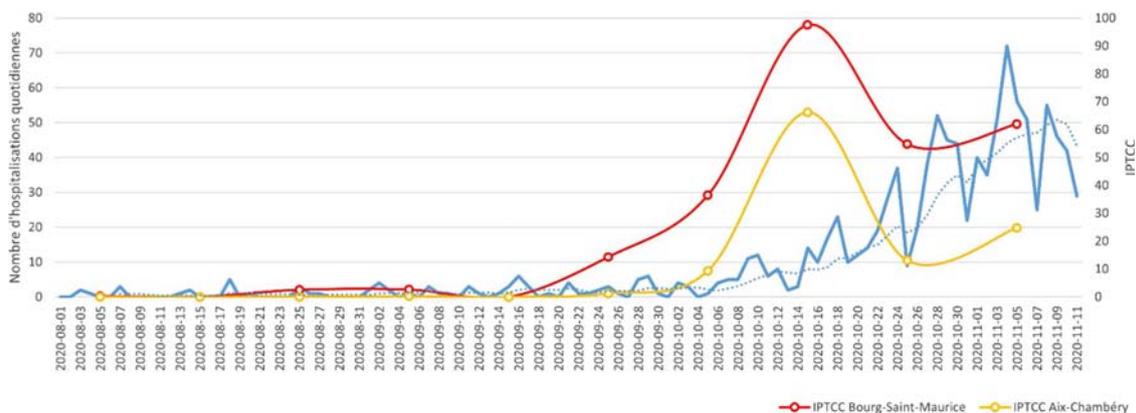


Figure 19. Nombre d'hospitalisations quotidiennes et IPTCC en Savoie entre le 1^{er} août et le 11 novembre 2020.

à des températures moins élevées que sur le reste du pays. Avec l'entrée dans la saison automnale, un temps plus humide et frais se met en place en France à partir du début du mois d'octobre. L'IPTCC est en augmentation sur la moitié nord du pays, mais reste assez peu élevé (Fig. 16). Il croît plus rapidement dans le Centre-Est. Le nombre d'hospitalisations quotidiennes en France reste stable mais on constate alors que nous sommes au début d'une reprise intense de l'activité épidémique.

La deuxième décade du mois d'octobre a été particulièrement fraîche en France. Le déficit thermique marqué a d'ailleurs permis au mois d'octobre 2020 d'être le premier en-dessous des normales de saison depuis mai 2019, mettant fin à une série inédite. L'IPTCC est particulièrement élevé à proximité des Alpes et d'une manière générale élevé sur l'ensemble du pays (Fig. 17). Il est plus modéré en Bretagne et dans le Sud-Ouest. La Corse fait exception.

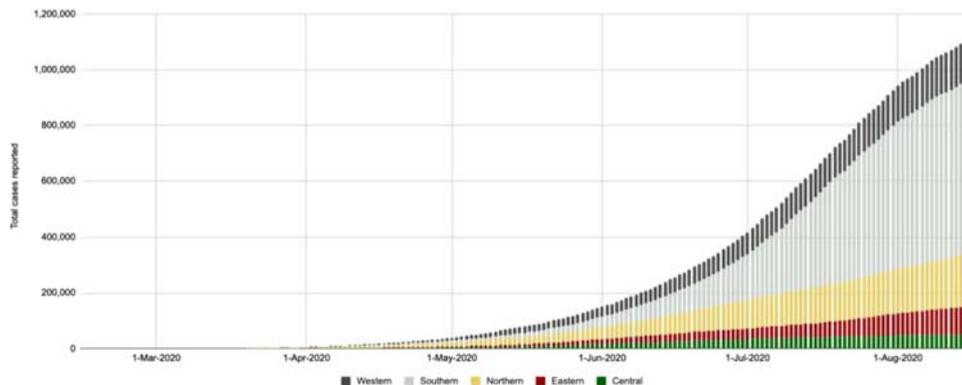


Figure 20. Nombre de cas de COVID-19 par région en Afrique durant la période du 13 février au 16 août 2020 (source : Africa CDC).

Une hausse très sensible du nombre de nouvelles hospitalisations quotidiennes est constatée à partir du 15 octobre (Fig. 17). La progression a ensuite été exponentielle jusqu'en fin de mois. Il semble donc y avoir un décalage d'une dizaine de jours entre des conditions climatiques favorables à la propagation du virus et les données épidémiologiques, ce qui est tout à fait cohérent compte-tenu du délai entre le moment de la contamination et une prise en charge éventuelle à l'hôpital. Sur l'ensemble du mois d'octobre, l'IPTCC moyen est élevé en comparaison avec le mois de septembre sur l'ensemble du

territoire (Fig. 18). La Bretagne, le Sud-Ouest et la Corse ont un IPTCC, alors qu'il est plus élevé dans la région alpine. L'IPTCC moyen entre le 1^{er} et le 31 octobre 2020 a été comparé au nombre d'hospitalisations liées à la pandémie COVID-19 par million d'habitants et par région entre le 1^{er} octobre et le 10 novembre 2020 (Fig. 18). Ce décalage de période entre le nombre d'hospitalisations le calcul du l'IPTCC est volontaire car la durée moyenne entre l'infection et l'hospitalisation est de 11 jours selon le Conseil Scientifique [10].

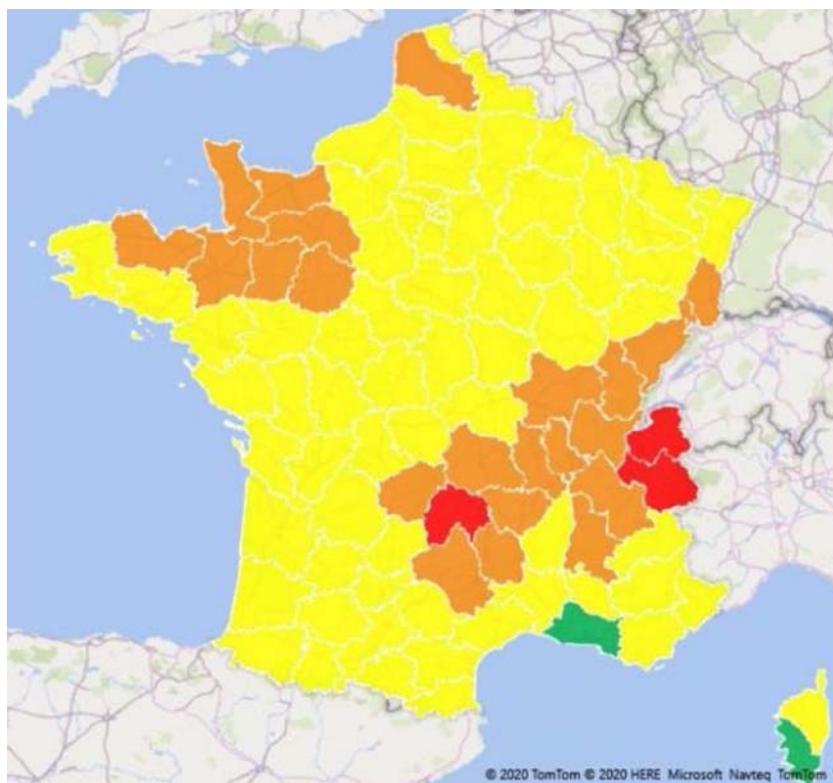


Figure 21. Prévission de l'IPTCC par département pour le 19 novembre 2020.

IPTCC \ Vulnérabilité	[0 - 20[	[20 - 75[	[75 - 90[	[90 - 97[	[97 - 100]
	Zone de vigilance	<i>Faible</i> Vigilance	<i>Faible</i> Vigilance	<i>Moyen</i> Prudence	<i>Fort</i> Sécurité	Fort Sécurité
Zone d'alerte	<i>Faible</i> Vigilance	<i>Moyen</i> Prudence	<i>Moyen</i> Prudence	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Fort</i> Sécurité
Zone d'alerte renforcée	<i>Moyen</i> Prudence	<i>Moyen</i> Prudence	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Fort</i> Sécurité
Zone d'alerte maximale	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Fort</i> Sécurité	<i>Très fort</i> Sécurité maximale	<i>Très fort</i> Sécurité maximale
Confinement national	Très fort Sécurité maximale	Très fort Sécurité maximale	Très fort Sécurité maximale	Très fort Sécurité maximale	<i>Très fort</i> Sécurité maximale

Figure 22. Matrice des risques selon l'IPTCC et la vulnérabilité départementale.

Les régions les plus touchées sont l'Auvergne-Rhône-Alpes, la Provence-Alpes-Côte-d'Azur, l'Île-de-France et la Bourgogne-Franche-Comté. L'IPTCC d'octobre est élevé dans ces régions. Au contraire, les régions Corse, Nouvelle-Aquitaine, Pays-de-Loire et Bretagne présentent des indicateurs hospitaliers moins alarmants. Ces régions ont aussi eu un IPTCC assez faible sur l'ensemble du mois.

La région Grand Est présente un IPTCC élevé durant le mois d'octobre 2020. Pourtant, le nombre d'hospitalisations par million d'habitants reste mesuré sur cette période en comparaison aux régions limitrophes. Cela pourrait s'expliquer notamment par un respect des gestes barrières et du port du masque plus strict dans cette région traumatisée par la première vague au printemps 2020 [11]. Le rôle de l'immunité collective n'est pas totalement écarté car 10 à 15 % de la population de cette région disposerait d'une immunité, ce qui est supérieur à la moyenne nationale, mais largement insuffisant pour contenir le virus (il faudrait une immunité collective de 60 à 70 %).

Les conditions climatiques de ce début d'automne semblent avoir eu un impact sur une reprise intense de l'activité épidémique en France à partir de la deuxième quinzaine du mois d'octobre. La deuxième vague a été intense dans plusieurs régions au cours de ce mois de novembre 2020 avec un pic atteint autour du 15. Les indicateurs de suivi de l'épidémie (taux de reproduction du virus, nombre de nouveaux cas quotidiens, taux d'incidence) se sont améliorés durant la deuxième partie du mois. Il est évident que le confinement généralisé décrété fin octobre a permis de diminuer les contaminations et par conséquent la tension hospitalière.

Le taux d'incidence très élevé de la Savoie

En Savoie, département de la région Rhône-Alpes, le taux d'incidence de la COVID-19 était le plus élevé de France au début du mois de novembre avec un pic à 1200 cas pour 100 000 habitants. Ce taux est passé sous les 1000 à la mi-novembre, mais la tension hospitalière restait très élevée dans le département avec un taux d'occupation des lits en réanimation de 150 %.

Les données de température et d'humidité de deux stations de Météo-France du département (Aix-Chambéry à 235 m d'altitude et Bourg-Saint-Maurice à 865 m) ont été extraites afin d'avoir une vision objective des conditions climatiques du département [4]. L'IPTCC de ces deux stations a été calculé et croisé avec le nombre d'hospitalisations quotidiennes dans le département depuis le début du mois d'août 2020 (Fig. 19). Jusqu'à la fin du mois de septembre, une très faible activité épidémique est observée, associée à un IPTCC quasi-nul compte-tenu des conditions météo encore douces voire chaudes. Puis l'IPTCC augmente durant la première et la deuxième décade d'octobre. La station de Bourg-Saint-Maurice, qui se trouve à une altitude plus élevée que celle d'Aix-Chambéry, présente un indice particulièrement élevé. L'IPTCC diminue durant la dernière décade d'octobre mais reste élevé, tout comme les dix premiers jours du mois de novembre.

Une importante hausse du nombre d'hospitalisations dans le département est constatée à partir du 20 octobre. Il y a donc un décalage d'environ 10 jours entre le moment où l'IPTCC augmente, puis celui où les admissions à l'hôpital s'élèvent. L'exemple de la Savoie, département rural dont le taux d'incidence est le plus élevé de France début novembre, permet d'évoquer l'existence d'une corrélation entre une période fraîche et humide et la hausse ultérieure du nombre d'hospitalisations liées à la COVID-19.

ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES

Cas des abattoirs

En mai 2020, plusieurs foyers ont été recensés dans des abattoirs en France, notamment l'abattoir de Kermené, à Saint-Jacut-du-Mené dans les Côtes-d'Armor où 109 cas d'infection par la COVID-19 ont été détectés sur 1027 testés, et 56 employés de l'établissement Tradival de Fleury-les-Aubrais (Loiret) ont été contaminés sur 397 dépistés.

La France n'est pas la seule touchée : en Irlande, en Allemagne, en Australie ou aux États-Unis, des centaines de cas avérés sont recensés dans les abattoirs ou les usines de

transformation de viande. Selon le Centre pour le contrôle et la prévention des maladies (*Centers for Disease Control and Prevention* : CDC), près de 4 % des salariés de cette industrie auraient été contaminés par la COVID-19 aux États-Unis depuis le début de l'épidémie [12].

Pour expliquer cela dans une industrie où les règles d'hygiène sont très strictes, la difficulté de respecter les règles de distanciations sociales et gestes barrières dans ces espaces confinés, ont été évoquées. Par ailleurs, dans les abattoirs l'environnement froid et humide est propice à la propagation du virus. Les températures se situent entre 4 et 12 °C. Les salles sont en permanence nettoyées au jet d'eau, ce qui peut dissemencer les particules infectées. Avec l'humidité, les masques peuvent perdre de leur capacité de filtration. Ces nombreux foyers au sein des abattoirs pourraient confirmer l'influence de la température et de l'humidité sur la propagation du virus avec un IPTCC très propice.

Déclenchement de l'épidémie dans des pays à fort indice : l'exemple sud-africain

La propagation du nouveau coronavirus a été observée dans plusieurs pays de l'hémisphère Sud. Les pays qui présentaient un IPTCC élevé entre les mois de juillet et d'août ont connu une nette augmentation du nombre de nouveaux cas de COVID-19. C'est notamment le cas en Argentine, en Afrique du Sud et dans une partie de l'Australie (région de Melbourne) (Fig. 12). Sur le continent africain, l'Afrique du Sud est le pays de loin le plus touché avec plus de 600 000 cas et 13 000 décès à la fin du mois d'août [13]. Vient ensuite l'Égypte avec près de 100 000 cas. Les régions centrales et orientales de l'Afrique sont peu touchées (Fig. 20). L'IPTCC au mois de juillet était en augmentation et devenait fort en Afrique du Sud tandis qu'il restait de très faible à nul sur le reste du continent africain (Fig. 12 et Fig. 20).

Ces éléments semblent confirmer la corrélation entre propagation de la COVID-19 et les conditions climatiques mise en avant dans l'hémisphère Nord lors de la première vague.

DISCUSSIONS

Limites de l'étude

Cette étude a pour seul objectif d'apporter des éléments de réflexion. Elle est très dépendante de la fiabilité et la disponibilité des données, notamment sur le nombre de cas et de décès recensés ainsi que sur les campagnes de test qui diffèrent selon les pays.

D'autres facteurs climatiques peuvent être influençant, tels que :

- les données sur les rayonnements UV ;
 - le taux de particules fines en suspension dans l'air, autre vecteur de propagation du virus ;
 - la stabilité de l'air et des turbulences de basses couches.
- Les paramètres météorologiques ne constituent pas à eux seuls des facteurs premiers de propagation du virus. D'autres facteurs sont à prendre en compte dans l'analyse globale tels que :
- le facteur anthropique lié aux déplacements des personnes ;
 - le niveau des mesures engagées et la chronologie dans la réponse par rapport à la crise COVID-19 hétérogènes d'un

pays à l'autre (confinement, fermetures des frontières, moyens de santé, etc.) ;

- le comportement et le respect des mesures engagées par les populations ;
- les conditions d'hygiène, d'accès aux soins, de qualité et de ressources des services de santé ;
- l'hétérogénéité des densités de population ;
- l'état de santé de la population (autres maladies, âge de la population, groupes sanguins etc.) ;
- les us et coutumes pouvant jouer sur la non prise en compte de la distanciation physique.

Des pays à faible indice

La pandémie de coronavirus sévit aussi dans des pays dont l'IPTCC est pourtant vert, c'est-à-dire que les conditions climatiques limitent la propagation aérienne du virus. C'est notamment le cas du Brésil et l'Inde qui font face à une forte progression des cas de coronavirus depuis le mois de mai 2020.

Les conditions climatiques ne sont évidemment pas le seul facteur jouant un rôle dans la propagation du COVID-19. Le respect des gestes barrières et des mesures de confinement lorsque cela est nécessaire sont un frein majeur à la diffusion de l'épidémie.

L'Inde et le Brésil font partie des pays émergents où les inégalités restent encore importantes, notamment entre les zones rurales et urbaines [14]. Parmi les états brésiliens comptant moins de quatre lits pour 10 000 habitants, on retrouve neuf états sur les 13 les plus touchés. Par ailleurs, le Président brésilien a refusé le confinement et fustigé les gouverneurs qui prenaient de telles mesures restrictives dans certains états du pays [15]. Enfin, les mesures de distanciation physique ne sont pas toujours faciles à respecter dans des quartiers où la densité de population est très importante. Selon un article de l'AFP du 27 juillet 2020, plus de la moitié des habitants des bidonvilles de Bombay en Inde a été touchée par la COVID-19 [16].

Tous les pays ne sont donc pas égaux face à cette pandémie et les facteurs humains (respect des gestes barrières, mesures de confinement, etc.) ont un rôle majeur sur son impact.

Perspectives : des cartes de prévisions de l'IPTCC

Cette étude montre l'intérêt potentiel de l'intégration des facteurs climatiques dans les stratégies de gestion de la crise de la COVID-19.

Le calcul de l'IPTCC dans chaque département à partir des prévisions de température et d'humidité fournis par les différentes stations de Météo-France devrait permettre de suivre son évolution à court terme à l'échelle de la France.

Par exemple pour la journée du 19 novembre 2020, l'IPTCC est globalement modéré sur l'ensemble du pays, plus élevé entre le Massif-Central et les Alpes ainsi que près des côtes de la Manche (Fig. 21).

Il est possible d'imaginer croiser l'IPTCC d'un département avec sa vulnérabilité à la COVID-19 (taux d'incidence, indicateurs hospitaliers) pour évaluer un niveau de risque. Une matrice des risques, qui croise l'IPTCC et les différents niveaux d'alerte par département, peut être élaborée (Fig. 22) et selon le niveau de risque établi, des recommandations générales peuvent être proposées (Fig. 23).



Niveaux	Recommandations générales
Vigilance	<ul style="list-style-type: none"> • Appliquer les gestes barrières et les mesures de distanciation physique • Porter un masque dans les lieux où cela est obligatoire (centres-villes, transports en commun, commerces) et lorsque la distanciation physique ne peut pas être respectée
Prudence	<ul style="list-style-type: none"> • Appliquer les gestes barrières et les mesures de distanciation physique • Porter un masque dans les lieux où cela est obligatoire (centres-villes, transports en commun, commerces) et lorsque la distanciation physique ne peut pas être respectée • Favoriser le télétravail lorsque cela est possible • Limiter les réunions au bureau, privilégier les outils d'échanges numériques • Favoriser les sorties individuelles • Limiter les regroupements familiaux et amicaux • Eviter les lieux à forte affluence
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Appliquer les gestes barrières et les mesures de distanciation physique • Porter un masque lors de tous les déplacements hors du domicile • Privilégier au maximum le télétravail • Privilégier les sorties individuelles • Annuler les regroupements familiaux et amicaux importants • Ne pas fréquenter les lieux à forte affluence
Sécurité maximale	Mesures de confinement ou de couvre-feu décrétées par le Gouvernement.

Figure 23. Consignes associées aux niveaux de risque.

CONCLUSION

De nombreuses études ont été publiées sur les liens entre la COVID-19 et le climat, confirmant l'intérêt porté à ce sujet par les scientifiques du monde entier. L'étude menée par Predict Services fait apparaître le rôle potentiel de la température et l'humidité dans la propagation de la COVID-19. Les facteurs anthropiques à travers le respect des gestes barrières conservent un impact essentiel sur la transmission du coronavirus. Il est maintenant nécessaire de valider les analyses, de tester la robustesse de cet index, pour réfléchir à l'intérêt de l'utilisation potentielle de ces éléments. C'est pourquoi il nous a semblé important de porter à la connaissance des autorités le résultat de ces travaux.

Cette épidémie n'est malheureusement pas terminée, le monde pourrait en connaître d'autres dans les prochaines années, nous nous devons de progresser collectivement pour rendre plus agiles nos réponses.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] Bukhari Q, Jameel Y. Will Coronavirus Pandemic Diminish by Summer?; 2020. [doi: 10.2139/ssrn.3556998](https://doi.org/10.2139/ssrn.3556998).
- [2] Julien H, Giudicelli C-P, Carpentier J-P. Catastrophe évolutive, quelle pourrait-être l'influence des conditions météorologiques sur l'évolution de la pandémie CoViD-19? Médecine de Catastrophe - Urgences Collectives 2020;4(3):175-80. [doi: 10.1016/j.pxur.2020.06.001](https://doi.org/10.1016/j.pxur.2020.06.001).
- [3] Bolton D. The Computation of Equivalent Potential Temperature" (PDF). Monthly Weather Review 1980;108(7):1046-53. [doi: 10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO).
- [4] Extranet de Météo-France, <https://pro.meteofrance.com/>
- [5] Coronavirus: chiffres clés et évolution de la COVID-19 en France et dans le monde, Santé Publique France, <https://www.santepubliquefrance.fr>.
- [6] Climate Reanalysis, Climate Change Service, <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>.
- [7] COVID-19 Coronavirus Pandemic, Worldometer, <https://www.worldometers.info/coronavirus>.
- [8] QGIS.org. QGIS Geographic Information System. QGIS Association; 2020 [<http://www.qgis.org>].

- [9] Les forums d'Infoclimat, www.infoclimat.fr.
- [10] Conseil scientifique. Avis du Conseil scientifique—Une deuxième vague entraînant une situation sanitaire critique; 2020 [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/note_conseil_scientifique_26_octobre_2020.pdf].
- [11] Coronavirus: pourquoi le Grand-Est résiste mieux, Les Echos, <https://www.lesechos.fr/pme-regions/grand-est/coronavirus-pourquoi-le-grand-est-resiste-mieux-1256967>.
- [12] Dyal JW, Grant MP, Broadwater K, Bjork A, Waltenburg MA, Gibbins JD, et al. COVID-19 Among Workers in Meat and Poultry Processing Facilities - 19 States, April 2020. Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR) 2020;69:557–61. doi: [10.15585/mmwr.mm6918e3external icon](https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6918e3external_icon).
- [13] Coronavirus disease 2019, Africa Centres for Disease Control and Prevention, <https://africacdc.org/covid-19>.
- [14] Porras L. Croissance, inégalités et pauvreté au sein des pays émergents: le cas des BRICS. Revue de la régulation 2015;18. doi: [10.4000/regulation.11480](https://doi.org/10.4000/regulation.11480) [<http://journals.openedition.org/regulation/11480>].
- [15] Coronavirus: au Brésil, Jair Bolsonaro rejette le confinement qui menace, selon lui, de ruiner le pays, Le Monde, https://www.lemonde.fr/international/article/2020/03/25/bolsonaro-rejette-le-confinement-qui-menace-selon-lui-de-ruiner-le-bresil_6034315_3210.html.
- [16] Inde: plus de la moitié des habitants des bidonvilles de Bombay ont été exposés au coronavirus. <https://www.lesechos.fr/monde/asia-pacifique/inde-plus-de-la-moitie-des-habitants-des-bidonvilles-de-bombay-ont-ete-exposes-au-coronavirus-1227095>.